

## บทที่ 6

### การวิเคราะห์ผลการทดสอบ

เนื้อหาในบทนี้จะแบ่งวิธีการวิเคราะห์และคำนวณค่าต่างๆ จากการทดสอบจุดกดแบบปรับเปลี่ยนด้วยตัวอย่างหินที่มีรูปร่างไม่เป็นเรขาคณิตออกเป็น 1) ค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่น 2) ค่ากำลังรับแรงกดสูงสุดในแกนเดียว 3) ค่ากำลังรับแรงดึงสูงสุด และ 4) ค่ากำลังรับแรงกดสูงสุดในสามแกน ค่าที่คำนวณได้ทั้งหมดจะถูกนำมาเปรียบเทียบและสอบทานด้วยผลการทดสอบแบบมาตรฐาน โดยผลของการคำนวณทั้งหมดของตัวอย่างหินทั้ง 3 ชนิด สรุปไว้ในตารางที่ 6.1 ถึงตารางที่ 6.3

#### 6.1 ค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่น

การคาดคะเนค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นจากการทดสอบจุดกดแบบปรับเปลี่ยนของตัวอย่างหินขนาดต่างๆ ที่ได้ทดสอบและตรวจวัดการยุบตัวของหัวกดตามค่าแรงกด โดยแสดงเป็นความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงค่าความเค้นของจุดกด ( $\Delta P$ ) กับการเปลี่ยนแปลงการยุบตัวของหัวกด ( $\Delta \delta$ ) ดังรูปในภาคผนวก ก ซึ่งสามารถคำนวณค่าอัตราส่วนระหว่างการเปลี่ยนแปลงค่าความเค้นของการทดสอบจุดกดแบบปรับเปลี่ยนกับการเปลี่ยนแปลงการยุบตัวของหัวกด ( $\Delta P/\Delta \delta$ ) จากความชันของแผนภูมิในช่วงที่ปล่อยให้ค่าของความเค้นลดลง (Unloading curve)

ค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นจากการทดสอบจุดกดแบบปรับเปลี่ยน ( $E_{mpl}$ ) สามารถคำนวณได้จากสมการ (Tepnarong, 2006)

$$E_{mpl} = (t\alpha_E) \cdot (\Delta P/\Delta \delta) \quad (6.1)$$

โดย  $\alpha_E$  คือ displacement function มีค่าเท่ากับ 2.60 ในกรณีที่ค่าอัตราส่วนของ  $t/d = 2.5-3.0$

#### 6.2 ค่ากำลังรับแรงกดสูงสุดในแกนเดียว

จากสมการที่ 4.7 สามารถคำนวณค่าความเค้นกดที่เกิดการวิบัติ ( $P_{mpl}$ ) ด้วยการนำค่าที่คำนวณได้ มา Plot กราฟระหว่างค่าความเค้นสูงสุดของจุดกด ( $P_{mpl}$ ) กับอัตราส่วนของความกว้างต่อขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางหัวกด ( $D_e/d$ ) แล้วทำการสร้างความสัมพันธ์หาเส้นแนวโน้ม (Fitted Curve) และหาสมการความสัมพันธ์เชิงเส้นของข้อมูลดังรูปที่ 4.19 ถึงรูปที่ 4.21 ต่อเส้นแนวโน้ม (Extrapolate) มาที่ค่า  $D_e/d = 1$  หรือแทนค่าลงไปในสมการจะได้ค่าแรงกดสูงสุดซึ่งที่จุดนี้ค่า  $P_{mpl}$  ที่ได้จะมีค่าเสมือนกับค่าความต้านแรงกดสูงสุดในแกนเดียว ( $\sigma_c$ ) (Tepnarong, 2001)

ตารางที่ 6.1 สรุปรวมผลการคำนวณของ Andesite จากการทดสอบจุดกดแบบปรับเปลี่ยน

Specimen Number	t/d	D <sub>d</sub> /d	$\Delta P/\Delta \delta$ (GPa/m)	$\alpha_E$	E <sub>impl</sub> (GPa)	P <sub>impl</sub> (MPa)	$\alpha_T$	$\beta_T$	$\sigma_{t, impl}$ (MPa)	$\sigma_1$ (MPa)	$\sigma_3$ (MPa)	$\tau_{max}$ (MPa)	$\sigma_{mean}$ (MPa)
AND-MPL-01	2.46	5.43	1.25	2.60	17.76	159	14.95	7.67	7.50	159	25.27	66.63	91.90
AND-MPL-02	3.51	6.32	1.80	2.60	24.30	471	16.97	6.61	16.88	471	75.83	197.76	273.58
AND-MPL-03	2.36	6.34	1.70	2.60	15.46	191	17.01	6.59	9.00	191	30.75	80.17	110.91
AND-MPL-04	2.66	9.60	2.34	2.60	23.90	319	22.52	3.69	12.40	319	51.98	133.25	185.22
AND-MPL-05	2.84	9.03	3.69	2.60	40.31	471	21.70	4.12	17.61	471	76.82	197.26	274.08
AND-MPL-06	2.45	7.93	1.82	2.60	17.12	357	19.99	5.02	15.58	357	57.92	149.38	207.30
AND-MPL-07	2.63	8.74	2.34	2.60	23.67	331	21.27	4.35	13.30	331	53.93	138.64	192.57
AND-MPL-08	2.61	9.80	1.71	2.60	17.17	268	22.79	3.55	10.53	268	43.68	111.92	155.60
AND-MPL-09	2.80	7.77	0.56	2.60	6.03	344	19.71	5.17	13.51	344	55.81	144.07	199.88
AND-MPL-10	2.44	5.69	1.24	2.60	17.48	159	15.57	7.34	7.46	159	25.35	66.59	91.94
AND-MPL-11	2.51	6.13	1.38	2.60	20.01	368	16.56	6.83	16.66	368	59.11	154.45	213.56
AND-MPL-12	2.26	6.31	1.89	2.60	24.64	340	16.95	6.62	16.62	340	54.65	142.53	197.17
AND-MPL-13	2.33	11.26	1.51	2.60	9.47	468	24.64	2.57	20.00	468	76.60	195.68	272.28
AND-MPL-14	2.79	12.03	1.65	2.60	12.39	572	25.52	2.11	20.22	572	93.72	239.11	332.83
AND-MPL-15	2.39	5.03	0.11	2.60	1.51	227	13.92	8.22	11.14	227	35.89	95.29	131.18

ตารางที่ 6.1 สรุปรวมผลการศึกษาของ Andesite จากการทดสอบจุดกดแบบปรับเปลี่ยน (ต่อ)

Specimen Number	t/d	D <sub>e</sub> /d	$\Delta P/\Delta \delta$ (GPa/m)	$\alpha_E$	E <sub>impl</sub> (GPa)	P <sub>impl</sub> (MPa)	$\alpha_T$	$\beta_T$	$\sigma_{t, impl}$ (MPa)	$\sigma_1$ (MPa)	$\sigma_3$ (MPa)	$\tau_{max}$ (MPa)	$\sigma_{mean}$ (MPa)
AND-MPL-16	2.81	4.74	0.12	2.60	1.95	170	13.14	8.63	7.65	170	26.78	71.54	98.31
AND-MPL-17	3.05	8.61	0.21	2.60	2.47	497	21.08	4.45	17.76	497	80.87	207.97	288.84
AND-MPL-18	2.33	6.53	0.08	2.60	1.08	283	17.40	6.38	13.40	283	45.61	118.74	164.35
AND-MPL-19	2.94	13.86	2.00	2.60	22.63	484	27.41	1.12	15.77	484	79.46	202.31	281.77
AND-MPL-20	2.65	8.60	0.17	2.60	1.73	522	21.06	4.46	20.91	522	85.01	218.64	303.65
AND-MPL-21	2.38	4.25	0.87	2.60	11.95	311	11.69	9.39	15.95	311	48.54	131.43	179.97
AND-MPL-22	2.30	4.17	0.87	2.60	11.54	255	11.42	9.53	13.38	255	39.62	107.58	147.20
AND-MPL-23	2.23	5.57	2.31	2.60	29.76	283	15.29	7.49	14.31	283	45.21	118.94	164.15
AND-MPL-24	2.50	7.60	1.12	2.60	16.15	311	19.41	5.32	13.47	311	50.49	130.45	180.94
AND-MPL-25	2.59	12.43	5.85	2.60	40.73	468	25.96	1.88	17.63	468	76.71	195.62	272.34
AND-MPL-26	3.03	5.60	1.43	2.60	16.67	395	15.35	7.46	16.13	395	63.08	165.91	228.99
AND-MPL-27	2.73	16.40	1.56	2.60	16.39	497	29.64	-0.06	16.71	497	81.67	207.57	289.24
AND-MPL-28	2.82	9.06	2.00	2.60	21.72	280	22.52	3.69	10.35	280	45.74	117.26	163.00
AND-MPL-29	3.11	9.34	1.56	2.60	18.68	369	22.16	3.88	12.72	369	60.26	154.59	214.84
AND-MPL-30	2.46	13.14	6.50	2.60	43.10	650	26.70	1.49	25.43	650	106.6	271.66	378.28

ตารางที่ 6.1 สรุปรวมผลการคำนวณของ Andesite จากการศึกษาทดสอบจุดกดแบบปรับเปลี่ยน (ต่อ)

Specimen Number	t/d	D <sub>u</sub> /d	$\Delta P/\Delta \delta$ (GPa/m)	$\alpha_E$	E <sub>mpl</sub> (GPa)	P <sub>mpl</sub> (MPa)	$\alpha_T$	$\beta_T$	$\sigma_{t, mpl}$ (MPa)	$\sigma_1$ (MPa)	$\sigma_3$ (MPa)	$\tau_{max}$ (MPa)	$\sigma_{mean}$ (MPa)
AND-MPL-31	2.62	9.82	1.75	2.60	17.66	255	22.82	3.53	9.97	255	41.60	106.59	148.19
AND-MPL-32	2.60	11.47	1.56	2.60	10.93	468	24.88	2.44	17.83	468	76.63	195.67	272.29
AND-MPL-33	2.40	7.00	1.01	2.60	13.98	255	18.32	5.90	11.61	255	41.18	106.80	147.98
AND-MPL-34	3.04	8.00	1.35	2.60	15.76	306	20.10	4.96	11.21	306	49.66	128.04	177.70
AND-MPL-35	2.50	4.55	1.27	2.60	12.21	280	12.59	8.91	13.70	280	44.01	118.12	162.13
AND-MPL-36	2.43	16.97	2.92	2.60	19.09	312	30.10	-0.30	11.81	312	51.30	130.34	181.63
AND-MPL-37	3.33	15.20	1.56	2.60	20.00	395	28.63	0.47	11.30	395	64.88	165.01	229.89
AND-MPL-38	2.38	6.61	2.60	2.60	16.65	442	17.55	6.30	20.54	442	71.25	185.35	256.61
AND-MPL-39	3.18	3.47	1.86	2.60	15.92	338	8.97	10.82	15.94	338	51.12	143.42	194.55
AND-MPL-40	2.45	5.51	2.60	2.60	17.12	390	15.13	7.58	18.47	390	62.22	163.87	226.09
AND-MPL-41	2.07	5.61	3.25	2.60	18.15	390	15.37	7.45	20.89	390	62.30	163.83	226.13
AND-MPL-42	2.23	4.25	2.31	2.60	29.76	283	11.69	9.39	15.07	283	44.13	119.48	163.61
AND-MPL-43	2.07	5.61	3.46	2.60	19.32	390	15.37	7.45	20.89	390	62.30	163.83	226.13
AND-MPL-44	3.24	3.40	2.34	2.60	29.12	395	8.71	10.96	18.64	395	59.52	167.69	227.21
AND-MPL-45	2.75	4.26	1.69	2.60	17.85	306	11.72	9.37	14.41	306	47.67	129.03	176.70

ตารางที่ 6.1 สรุปรวมผลการคำนวณของ Andesite จากการทดสอบจุดกดแบบปรับเปลี่ยน (ต่อ)

Specimen Number	t/d	D <sub>d</sub> /d	$\Delta P/\Delta \delta$ (GPa/m)	$\alpha_E$	E <sub>mpl</sub> (GPa)	P <sub>mpl</sub> (MPa)	$\alpha_T$	$\beta_T$	$\sigma_{t, mpl}$ (MPa)	$\sigma_1$ (MPa)	$\sigma_3$ (MPa)	$\tau_{max}$ (MPa)	$\sigma_{mean}$ (MPa)
AND-MPL-46	3.02	3.97	1.75	2.60	20.33	166	10.79	9.86	7.60	166	25.59	70.01	95.60
AND-MPL-47	2.55	3.14	1.70	2.60	16.67	127	7.66	11.51	11.59	127	32.11	92.23	124.33
AND-MPL-48	2.57	2.20	0.94	2.60	13.93	142	2.91	14.01	8.45	142	18.52	61.51	80.03
AND-MPL-49	2.56	2.14	0.57	2.60	8.43	74	2.57	14.19	4.43	74	9.50	32.05	41.55
AND-MPL-50	2.43	1.66	0.78	2.60	10.94	102	-0.78	15.95	9.28	102	14.93	63.31	78.23
Average													14.27
Standard Deviation													4.4

ตารางที่ 6.2 สรุปผลผลการคำนวณของ Silicified Tuffaceous Sandstone จากการทดสอบจุดกดแบบปรับเปลี่ยน

Specimen Number	t/d	$D_e/d$	$\Delta P/\Delta \delta$ (GPa/m)	$\alpha_E$	$E_{mpl}$ (Gpa)	$P_{mpl}$ (Mpa)	$\alpha_T$	$\beta_T$	$\sigma_{t, mpl}$ (Mpa)	$\sigma_1$ (Mpa)	$\sigma_3$ (Mpa)	$\tau_{max}$ (Mpa)	$\sigma_{mean}$ (Mpa)
SST-MPL-01	3.00	7.82	2.80	2.60	22.62	442	13.36	8.51	20.18	442	73.89	197.03	270.92
SST-MPL-02	2.50	4.80	3.07	2.60	20.66	572	13.31	8.53	27.59	572	90.28	240.83	331.12
SST-MPL-03	3.14	4.24	3.56	2.60	43.02	433	11.96	9.24	18.88	433	67.67	182.73	250.40
SST-MPL-04	2.92	8.09	4.50	2.60	35.33	572	20.24	4.89	21.55	572	92.93	239.51	332.44
SST-MPL-05	2.75	11.42	5.32	2.60	39.39	780	24.83	2.47	28.27	780	127.7	326.11	453.82
SST-MPL-06	3.08	4.90	2.73	2.60	22.66	494	13.57	8.40	20.86	494	78.11	207.92	286.03
SST-MPL-07	3.17	6.11	4.18	2.60	35.72	728	16.51	6.85	28.08	728	116.9	305.52	422.41
SST-MPL-08	2.33	6.84	4.14	2.60	25.95	624	18.00	6.06	29.32	624	100.8	261.60	362.35
SST-MPL-09	2.55	4.80	3.71	2.60	25.46	598	13.31	8.53	28.49	598	94.39	251.78	346.17
SST-MPL-10	2.17	7.72	9.58	2.60	55.93	312	19.62	5.22	15.29	312	50.61	130.68	181.29
SST-MPL-11	3.12	9.03	4.00	2.60	33.60	702	21.70	4.12	24.36	702	114.4	293.77	408.17
SST-MPL-12	2.55	10.94	2.72	2.60	18.64	390	24.26	2.77	15.33	390	63.81	163.08	226.89
SST-MPL-13	2.86	7.42	4.08	2.60	44.35	510	19.10	5.49	20.11	510	82.55	213.50	296.05
SST-MPL-14	2.48	6.15	2.96	2.60	42.35	198	16.61	6.80	9.05	198	31.83	83.16	115.00
SST-MPL-15	2.53	8.05	2.82	2.60	19.18	546	20.17	4.92	23.12	546	88.69	228.63	317.32

ตารางที่ 6.2 สรุปรวมผลการคำนวณของ Silicified Tuffaceous Sandstone จากการศึกษาจุดกอดแบบปรับเปลี่ยน (ต่อ)

Specimen Number	t/d	D <sub>e</sub> /d	ΔP/Δδ (GPa/m)	α <sub>E</sub>	E <sub>impl</sub> (Gpa)	P <sub>impl</sub> (Mpa)	α <sub>T</sub>	β <sub>T</sub>	σ <sub>t, impl</sub> (Mpa)	σ <sub>1</sub> (Mpa)	σ <sub>3</sub> (Mpa)	τ <sub>max</sub> (Mpa)	σ <sub>mean</sub> (Mpa)
SST-MPL-16	2.43	10.94	2.60	2.60	16.98	390	24.26	2.77	16.07	390	63.81	163.08	226.89
SST-MPL-17	2.34	10.90	4.16	2.60	26.21	650	24.21	2.80	27.80	650	106.3	271.80	378.14
SST-MPL-18	2.53	13.71	4.73	2.60	32.24	624	27.26	1.20	23.54	624	102.4	260.77	363.17
SST-MPL-19	3.27	4.34	3.30	2.60	41.53	408	11.96	9.24	17.40	408	63.69	171.98	235.67
SST-MPL-20	2.70	3.10	2.78	2.60	28.63	497	7.48	11.60	26.18	497	73.44	211.69	285.13
SST-MPL-21	2.69	6.91	1.85	2.60	19.14	522	18.16	5.99	21.81	522	84.38	218.96	303.33
SST-MPL-22	3.12	5.04	1.82	2.60	21.83	484	13.94	8.21	20.12	484	76.72	203.68	280.40
SST-MPL-23	3.19	6.27	1.50	2.60	18.39	331	16.86	6.67	12.63	331	56.26	138.97	192.24
SST-MPL-24	2.81	6.89	2.95	2.60	31.93	420	18.12	6.01	16.99	420	67.90	176.24	244.14
SST-MPL-25	2.10	7.20	2.59	2.60	20.90	497	18.69	5.70	25.41	497	80.39	208.21	288.60
SST-MPL-26	3.03	7.75	2.21	2.60	25.77	471	19.68	5.19	17.45	471	76.48	197.43	273.91
SST-MPL-27	2.72	7.14	2.74	2.60	28.62	395	18.59	5.76	16.23	395	63.88	165.51	229.39
SST-MPL-28	2.92	8.55	2.09	2.60	23.50	764	20.98	4.50	28.30	764	124.4	319.97	444.36
SST-MPL-29	3.10	7.42	1.76	2.60	20.97	510	19.10	5.49	18.81	510	82.55	213.50	296.05
SST-MPL-30	2.84	8.47	1.58	2.60	17.28	522	20.87	4.56	19.81	522	84.98	218.66	303.64

ตารางที่ 6.2 สรุปรวมผลการคำนวณของ Silicified Tuffaceous Sandstone จากการศึกษาทดสอบจุดกดแบบปรับเปลี่ยน (ต่อ)

Specimen Number	t/d	D <sub>e</sub> /d	$\Delta P/\Delta \delta$ (GPa/m)	$\alpha_E$	E <sub>mpl</sub> (Gpa)	P <sub>mpl</sub> (Mpa)	$\alpha_T$	$\beta_T$	$\sigma_{t, mpl}$ (Mpa)	$\sigma_1$ (Mpa)	$\sigma_3$ (Mpa)	$\tau_{max}$ (Mpa)	$\sigma_{mean}$ (Mpa)
SST-MPL-31	3.20	8.91	4.64	2.60	57.07	828	21.53	4.21	28.32	828	134.9	346.56	481.46
SST-MPL-32	2.61	2.56	1.78	2.60	26.78	226	4.92	12.95	12.82	226	31.65	97.41	129.06
SST-MPL-33	2.24	4.05	1.31	2.60	16.90	311	11.06	9.72	16.72	311	48.25	131.57	179.82
SST-MPL-34	2.31	3.79	2.15	2.60	28.63	255	10.17	10.19	13.63	255	39.12	107.83	146.95
SST-MPL-35	2.90	4.42	1.90	2.60	31.74	594	12.21	9.12	26.90	594	93.07	250.71	343.77
SST-MPL-36	2.41	5.21	1.02	2.60	14.16	283	14.39	7.97	13.74	283	44.99	119.05	164.04
SST-MPL-37	2.75	6.05	0.67	2.60	10.64	340	16.39	6.92	14.45	340	54.52	142.59	197.11
SST-MPL-38	2.63	6.16	1.27	2.60	19.26	368	16.61	6.80	16.11	368	59.12	154.45	213.57
SST-MPL-39	2.27	6.15	2.29	2.60	30.05	198	16.61	6.80	9.69	198	31.83	83.16	115.00
SST-MPL-40	2.36	5.08	0.90	2.60	12.26	311	14.06	8.14	15.40	311	49.39	131.00	180.39
SST-MPL-41	3.18	11.42	4.98	2.60	42.64	780	24.83	2.47	25.00	780	127.7	326.11	453.82
SST-MPL-42	3.03	8.09	3.92	2.60	31.96	546	20.24	4.89	19.99	546	88.70	228.62	317.33
SST-MPL-43	2.28	8.05	2.44	2.60	15.00	546	20.17	4.92	25.30	546	88.69	228.63	317.32
SST-MPL-44	2.83	11.42	5.71	2.60	43.48	780	24.83	2.47	27.57	780	127.7	326.11	453.82
SST-MPL-45	2.77	7.72	7.80	2.60	58.26	312	19.62	5.22	12.36	312	50.61	130.68	181.29

ตารางที่ 6.2 สรุปรวมผลการคำนวณของ Silicified Tuffaceous Sandstone จากการศึกษาทดสอบจุดกอดแบบปรับเปลี่ยน (ต่อ)

Specimen Number	t/d	D <sub>e</sub> /d	ΔP/Δδ (GPa/m)	α <sub>E</sub>	E <sub>mpl</sub> (Gpa)	P <sub>mpl</sub> (Mpa)	α <sub>T</sub>	β <sub>T</sub>	σ <sub>t, mpl</sub> (Mpa)	σ <sub>1</sub> (Mpa)	σ <sub>3</sub> (Mpa)	τ <sub>max</sub> (Mpa)	σ <sub>mean</sub> (Mpa)
SST-MPL-46	2.88	12.06	4.11	2.60	31.84	728	25.55	2.09	25.02	728	119.3	304.33	423.61
SST-MPL-47	2.50	5.08	3.09	2.60	44.64	323	14.06	8.14	15.33	323	51.19	135.77	186.95
SST-MPL-48	2.75	4.42	3.38	2.60	53.64	594	12.21	9.12	27.69	594	93.07	250.71	343.77
SST-MPL-49	2.72	6.05	2.54	2.60	39.81	368	16.39	6.92	15.80	368	59.06	154.47	213.54
SST-MPL-50	2.60	8.05	3.60	2.60	25.23	520	20.17	4.92	21.47	520	84.47	217.74	302.21
Average					29.86				20.45				
Standard Deviation					11.90				5.6				

ตารางที่ 6.3 สรุปรวมผลการศึกษาความถ่วงของ Pebbly Tuffaceous Sandstone จากการศึกษาทดสอบจุดแตกแบบปรับเปลี่ยน

Specimen Number	t/d	D <sub>g</sub> /d	$\Delta P/\Delta \delta$ (GPa/m)	$\alpha_E$	E <sub>mpl</sub> (GPa)	P <sub>mpl</sub> (MPa)	$\alpha_T$	$\beta_T$	$\sigma_{T, mpl}$ (MPa)	$\sigma_1$ (MPa)	$\sigma_3$ (MPa)	$\tau_{max}$ (MPa)	$\sigma_{mean}$ (MPa)
TST-MPL-01	2.70	5.46	2.12	2.60	22.02	293	15.02	7.63	12.99	293	46.72	123.13	169.86
TST-MPL-02	2.58	7.87	3.26	2.60	32.32	293	19.88	5.08	12.26	293	47.56	122.72	170.28
TST-MPL-03	2.75	7.30	1.43	2.60	15.13	255	18.88	5.60	10.31	255	41.25	106.76	148.01
TST-MPL-04	2.82	7.15	1.43	2.60	15.51	510	18.60	5.75	20.35	510	82.43	213.56	295.99
TST-MPL-05	2.54	13.45	2.64	2.60	25.79	280	27.01	1.33	10.58	280	45.99	117.13	163.12
TST-MPL-06	2.92	8.93	1.43	2.60	16.06	255	21.56	4.20	9.33	255	41.51	106.63	148.14
TST-MPL-07	2.43	8.53	1.12	2.60	22.73	311	20.95	4.51	13.46	311	50.67	130.36	181.03
TST-MPL-08	2.87	10.47	3.19	2.60	35.21	268	22.79	3.55	9.70	268	43.68	111.92	155.60
TST-MPL-09	2.30	7.87	2.12	2.60	18.75	471	19.88	5.08	21.79	471	76.51	197.41	273.93
TST-MPL-10	2.30	4.27	1.32	2.60	17.52	147	11.76	9.35	7.69	147	22.96	62.12	85.08
TST-MPL-11	2.82	12.43	3.19	2.60	34.55	573	25.96	1.88	19.94	573	93.97	239.64	333.61
TST-MPL-12	2.54	6.04	1.27	2.60	12.41	255	16.36	6.93	11.49	255	40.89	106.95	147.83
TST-MPL-13	2.88	11.80	1.59	2.60	17.64	369	25.27	2.24	12.74	369	60.52	154.45	214.97
TST-MPL-14	2.51	6.31	1.70	2.60	24.65	232	16.95	6.62	10.44	232	37.34	97.39	134.74
TST-MPL-15	2.14	11.04	2.60	2.60	15.00	312	24.38	2.71	14.65	312	51.05	130.46	181.51

ตารางที่ 6.3 สรุปรวมผลการคำนวณของ Pebbly Tuffaceous Sandstone จากการทดสอบจุดกดแบบปรับเปลี่ยน (ต่อ)

Specimen Number	t/d	D <sub>z</sub> /d	ΔP/Δδ (GPa/m)	α <sub>E</sub>	E <sub>mpl</sub> (Gpa)	P <sub>mpl</sub> (Mpa)	α <sub>T</sub>	β <sub>T</sub>	σ <sub>t, mpl</sub> (Mpa)	σ <sub>1</sub> (Mpa)	σ <sub>3</sub> (Mpa)	τ <sub>max</sub> (Mpa)	σ <sub>mean</sub> (Mpa)
TST-MPL-16	2.29	4.86	1.02	2.60	13.45	215	13.47	8.45	10.98	215	34.00	90.57	124.57
TST-MPL-17	2.59	7.15	6.50	2.60	45.30	286	18.61	5.75	12.20	286	46.26	119.86	166.12
TST-MPL-18	2.43	2.85	0.73	2.60	10.25	102	6.37	12.19	5.71	102	14.74	43.58	58.33
TST-MPL-19	2.85	3.16	1.28	2.60	21.05	130	7.76	11.46	6.65	130	19.34	55.44	74.78
TST-MPL-20	2.41	2.95	1.70	2.60	23.60	102	6.85	11.94	5.68	102	14.89	43.51	58.40
TST-MPL-21	2.98	4.17	1.00	2.60	17.22	170	11.43	9.52	7.71	170	26.41	71.72	98.13
TST-MPL-22	2.65	6.42	0.88	2.60	8.96	170	11.78	9.34	10.59	170	26.50	71.68	98.17
TST-MPL-23	3.14	6.11	1.01	2.60	18.30	255	16.52	6.85	9.89	255	40.91	106.93	147.84
TST-MPL-24	3.03	4.81	1.24	2.60	21.66	368	14.23	8.05	15.45	368	58.43	154.76	213.22
TST-MPL-25	2.23	2.23	1.26	2.60	10.83	331	3.13	13.89	20.18	331	43.70	143.76	187.45
TST-MPL-26	2.73	6.52	1.78	2.60	18.69	331	17.38	6.40	13.89	331	53.36	138.92	192.29
TST-MPL-27	2.16	8.87	1.70	2.60	20.65	535	21.46	4.24	18.50	535	87.16	223.94	311.09
TST-MPL-28	3.19	7.18	1.64	2.60	20.11	369	18.66	5.72	13.50	369	59.77	154.83	214.60
TST-MPL-29	3.10	7.42	1.28	2.60	11.36	255	14.25	8.04	12.76	255	40.46	107.16	147.62
TST-MPL-30	2.60	6.41	2.80	2.60	28.00	484	17.15	6.51	21.14	484	77.93	203.07	281.00

ตารางที่ 6.3 สรุปรวมผลการคำนวณของ Pebbly Tuffaceous Sandstone จากการศึกษาทดสอบจุดกอดแบบปรับเปลี่ยน (ต่อ)

Specimen Number	t/d	D <sub>e</sub> /d	ΔP/Δδ (GPa/m)	α <sub>E</sub>	E <sub>mpl</sub> (GPa)	P <sub>mpl</sub> (MPa)	α <sub>T</sub>	β <sub>T</sub>	σ <sub>t, mpl</sub> (MPa)	σ <sub>1</sub> (MPa)	σ <sub>3</sub> (MPa)	τ <sub>max</sub> (MPa)	σ <sub>mean</sub> (MPa)
TST-MPL-31	2.87	4.96	1.58	2.60	17.42	420	13.73	8.32	18.46	420	66.54	176.92	243.46
TST-MPL-32	2.64	3.68	1.70	2.60	17.25	293	9.76	10.41	14.75	293	44.77	124.11	168.88
TST-MPL-33	2.38	4.15	1.30	2.60	11.92	293	11.51	9.48	15.04	293	45.60	123.70	169.30
TST-MPL-34	2.71	8.24	2.60	2.60	19.42	364	20.49	4.76	14.18	364	59.17	152.40	211.57
TST-MPL-35	2.83	8.00	3.25	2.60	24.78	572	20.10	4.96	22.10	572	92.90	239.53	332.42
TST-MPL-36	2.42	10.13	3.25	2.60	21.15	468	23.24	3.31	19.65	468	76.46	195.75	272.21
TST-MPL-37	2.54	7.15	2.17	2.60	14.84	234	18.61	5.75	10.13	234	37.85	98.06	135.92
TST-MPL-38	2.10	7.55	5.20	2.60	29.44	390	19.32	5.37	19.76	390	63.21	163.38	226.59
TST-MPL-39	2.93	5.08	2.60	2.60	20.52	286	14.06	8.14	12.29	286	45.36	120.31	165.67
TST-MPL-40	2.73	4.10	3.47	2.60	25.52	260	11.24	9.63	12.43	260	40.36	109.81	150.17
TST-MPL-41	2.34	6.28	2.60	2.60	16.38	208	16.88	6.66	9.90	208	33.45	87.27	120.71
TST-MPL-42	2.59	4.33	2.60	2.60	18.14	338	11.94	9.26	16.39	338	52.79	142.59	195.38
TST-MPL-43	2.65	5.46	4.35	2.60	44.40	280	15.02	7.63	12.57	280	44.69	117.78	162.47
TST-MPL-44	2.55	8.29	2.22	2.60	32.65	147	20.57	4.72	6.14	147	23.94	61.63	85.57
TST-MPL-45	2.54	3.68	3.15	2.60	30.75	306	9.76	10.41	15.68	306	46.71	129.51	176.22

ตารางที่ 6.3 สรุปรวมผลการคำนวณของ Pebbly Tuffaceous Sandstone จากการทดสอบจุดกดแบบปรับเปลี่ยน (ต่อ)

Specimen Number	t/d	D <sub>e</sub> /d	ΔP/Δδ (GPa/m)	α <sub>E</sub>	E <sub>mpl</sub> (GPa)	P <sub>mpl</sub> (MPa)	α <sub>T</sub>	β <sub>T</sub>	σ <sub>t, mpl</sub> (MPa)	σ <sub>1</sub> (MPa)	σ <sub>3</sub> (MPa)	τ <sub>max</sub> (MPa)	σ <sub>mean</sub> (MPa)
TST-MPL-46	2.93	6.95	2.22	2.60	25.02	210	18.22	5.95	18.46	210	76.16	197.59	273.75
TST-MPL-47	2.47	2.97	1.28	2.60	18.27	102	6.91	11.90	5.61	102	14.91	43.59	58.41
TST-MPL-48	3.10	6.11	2.37	2.60	42.40	170	16.52	6.85	6.65	170	27.28	71.29	98.70
TST-MPL-49	2.25	3.37	3.71	2.60	22.52	416	19.39	5.33	19.72	416	67.44	174.26	241.70
TST-MPL-50	2.59	4.10	3.94	2.60	27.46	312	11.20	9.65	15.37	312	48.41	131.78	180.19
<b>Average</b>													<b>13.36</b>
<b>Standard Deviation</b>													<b>5.6</b>

### 6.3 ค่ากำลังรับแรงดึงสูงสุด

การคำนวณหาค่าแรงดึงสูงสุดจากการทดสอบจุดกดแบบปรับเปลี่ยนสามารถหาได้จากความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นกดที่เกิดการวิบัติ ( $P_{mpl}$ ) ภายใต้จุดกดและอัตราส่วนความหนาของตัวอย่างหินต่อขนาดของหัวกด ( $t/d$ )

ค่าแรงดึงสูงสุดจากการทดสอบจุดกดแบบปรับเปลี่ยนคำนวณได้จากสมการ (Tepnarong, 2001)

$$\sigma_{t, mpl} = P_{mpl} / (\alpha_T \ln(t/d) + \beta_T) \quad (6.2)$$

โดยค่าคงที่  $\alpha_T = 13.3 \ln(D_o/d) - 7.56$  และ  $\beta_T = -7.0 \ln(D_e/d) + 19.52$

### 6.4 ค่ากำลังรับแรงกดสูงสุดในสามแกน

การคำนวณหาค่าความเค้นหลักต่ำสุด ( $\sigma_3$ ) ที่จุดวิบัติที่สัมพันธ์กับค่าความเค้นหลักสูงสุดที่หัวกด ( $\sigma_1$ ) โดยสมมติให้ค่าความเค้นเฉือนบนแนวทรงกระบอกระหว่างหัวกดในหินมีค่าน้อยมาก ดังนั้นค่าความเค้นในแนวรัศมี ( $\sigma_r$ ) จึงมีค่าเท่ากับค่าความเค้นหลักต่ำสุด ความสัมพันธ์อย่างง่ายได้ถูกพัฒนาขึ้นในรูปแบบของอัตราส่วนระหว่างค่าความเค้นหลักสูงสุดต่อค่าความเค้นหลักต่ำสุด ( $\sigma_1/\sigma_3$ ) อัตราส่วนของปัวซอง ( $\nu$ ) และอัตราส่วนของเส้นผ่าศูนย์กลาง ( $D_o/d$ ) เพื่อใช้ในการคาดคะเนค่ากำลังอัดสูงสุดภายใต้แรงดันของตัวอย่างหิน โดยสามารถคำนวณหาค่าความเค้นหลักสูงสุดและต่ำสุดได้ตามสมการ (Tepnarong, 2006)

$$\sigma_1 = P_{mpl} \quad (6.3)$$

และ 
$$\sigma_3 = P_{mpl} / 2[(\nu/(1-\nu))(1-(d/D_o)^2)]^{-1} \quad (6.4)$$

การคำนวณค่าแรงกดสูงสุดในสามแกนจากการทดสอบจุดกดแบบปรับเปลี่ยนนั้นจะนำไปคำนวณหาค่าความเค้นในแนวเฉือน (Maximum shear stress,  $\frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3)$ ) และค่าความเค้นเฉลี่ย (Mean stress,  $\frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_3)$ ) เพื่อที่จะกำหนดเป็นเกณฑ์การแตกของ Coulomb ค่าของความเค้นหลักสูงสุดและต่ำสุดจะผันแปรตามอัตราส่วนความกว้างต่อขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางหัวกด ( $D_o/d$ ) และอัตราส่วนความหนาต่อขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางหัวกด ( $t/d$ )

### 6.5 การเปรียบเทียบผลการทดสอบ

จุดประสงค์หลักของการเปรียบเทียบคือ เพื่อสอบทานการทดสอบจุดกดแบบปรับเปลี่ยนของตัวอย่างหินที่ไม่มีรูปทรงเรขาคณิต ซึ่งงานวิจัยนี้ได้ทำการทดสอบกับตัวอย่างหิน

ทั้งหมด 3 ชนิด ผลการทดสอบแรงกดในแกนเดียวและตรวจวัดค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่น การทดสอบแรงกดในสามแกน และการทดสอบแรงดึงแบบบราซิลเลียน รวมทั้งการทดสอบจุดกดแบบดั้งเดิมตามมาตรฐาน ASTM และ ISRM จะถูกนำมาเปรียบเทียบผลที่ได้จากการทดสอบจุดกดแบบปรับเปลี่ยนที่ได้กล่าวมาในหัวข้อที่ 6.1 ถึง 6.4

ตารางที่ 6.4 เปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่น (Elastic modulus) ที่ได้จากการตรวจวัดการทดสอบแรงกดในแกนเดียว และค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นที่ได้จากการประเมินการตรวจวัดด้วยวิธีทดสอบจุดกดแบบปรับเปลี่ยนพบว่า การคาดคะเนค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นของหินด้วยวิธีทดสอบจุดกดแบบปรับเปลี่ยนจะได้ค่าที่อยู่ในช่วงต่ำกว่าเล็กน้อยเมื่อเทียบกับค่าที่ตรวจวัดได้จากการทดสอบด้วยวิธีมาตรฐาน

ตารางที่ 6.5 เปรียบเทียบระหว่างผลของค่ากำลังรับแรงกดและแรงดึงตามมาตรฐาน โดยผลที่ได้จากการทดสอบจุดกดแบบปรับเปลี่ยนของหินทั้ง 3 ชนิด พบว่าการคาดคะเนค่ากำลังรับแรงกดสูงสุดด้วยวิธีทดสอบจุดกดแบบปรับเปลี่ยนจะมีค่าที่ใกล้เคียงและแม่นยำกว่าค่าที่ได้จากการคาดคะเนด้วยวิธีทดสอบจุดกดแบบดั้งเดิม และยังสามารถคาดคะเนค่ากำลังรับแรงดึงสูงสุดได้ใกล้เคียงกับการทดสอบแรงดึงแบบบราซิล

ตารางที่ 6.6 แสดงค่าของมุมเสียดทานภายในและค่าความเค้นยึดติดจากการทดสอบแรงกดในสามแกนตามมาตรฐาน ASTM และ ISRM สามารถนำมาเปรียบเทียบกับผลการคาดคะเนค่าแรงกดในสามแกนจากการทดสอบจุดกดแบบปรับเปลี่ยนตามรายละเอียดการทดสอบในบทที่ 4 โดยนำผลค่าความเค้นในแนวเฉือน ( $\frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3)$ ) และความเค้นเฉื่อยต่อความเค้นกด ( $\frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_3)$ ) มาสร้างความสัมพันธ์เป็นกฎเกณฑ์การแตก (Failure criterion) เพื่อสามารถเปรียบเทียบผลได้อย่างชัดเจนดังรูปที่ 6.1 ถึงรูปที่ 6.3

ค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นที่คำนวณได้จาก MPL เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับผลการทดสอบแบบมาตรฐานพบว่า ค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นจาก MPL จะมีค่าค่อนข้างสูงกว่าค่าที่ทดสอบได้ด้วยวิธีมาตรฐาน ความแตกต่างทั้งหมดนี้คาดว่าเกิดจากผลกระทบด้านขนาดของตัวอย่างหิน และจากการกระจายตัวของความเค้นกดและความเค้นดึงในตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบแบบ MPL ซึ่งเมื่อเทียบกับตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบแรงกดในแกนเดียวจะมีเพียงความเค้นกดเท่านั้นที่กระจายตัวอยู่ นอกจากนั้นความแตกต่างของผลที่คำนวณได้จากการทดสอบทั้งสองอาจเกิดจากการแปรเปลี่ยนของคุณสมบัติภายใน (Intrinsic variability) ของตัวอย่างหินแต่ละชิ้นที่ใช้ในการทดสอบแบบ MPL ซึ่งจะสังเกตได้จากค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานของ MPL ที่มีค่อนข้างสูงและสามารถอธิบายได้จากพื้นที่หรือปริมาตรของหินที่อยู่ภายใต้หัวกดซึ่งมีขนาดเล็กจึงทำให้ผลกระทบทั้งจากขนาดของผลึกแร่หรือเม็ดหินมีสูงขึ้นเมื่อเทียบกับปริมาตรหินที่มีขนาดใหญ่กว่า ดังเช่นตัวอย่างหินที่ใช้ในการทดสอบแรงกดในแกนเดียวแบบมาตรฐาน

ตารางที่ 6.4 เปรียบเทียบระหว่างผลของค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นตามมาตรฐาน และผลที่ได้จากการทดสอบจุดกดแบบปรับเปลี่ยนของหินทั้ง 3 ชนิด

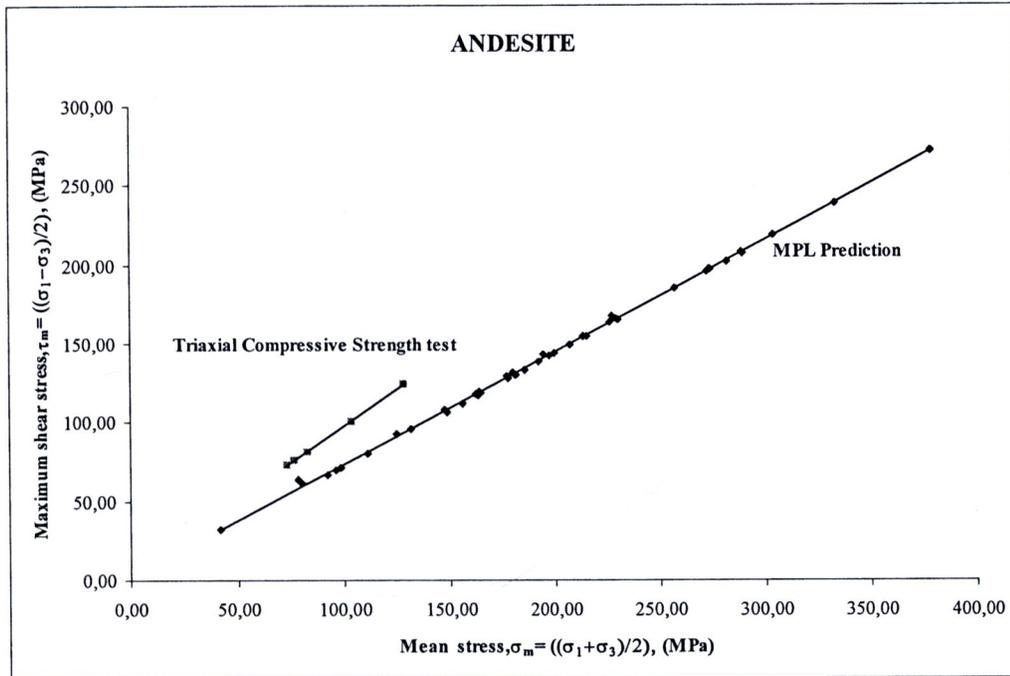
Rock Type	Tangential Elastic Modulus from UCS tests, $E_t$ (GPa)	Elastic Modulus from MPL Prediction, $E_{mpl}$ (GPa)
Andesite	43.0±3.4	17.4±9.1
Silicified Tuffaceous sandstone	63.3±8.0	29.9±11.9
Pebbly Tuffaceous sandstone	51.3±5.3	21.9±8.3

ตารางที่ 6.5 เปรียบเทียบระหว่างผลของค่ากำลังรับแรงกดและแรงดึงตามมาตรฐาน และผลที่ได้จากการทดสอบจุดกดแบบปรับเปลี่ยนของหินทั้ง 3 ชนิด

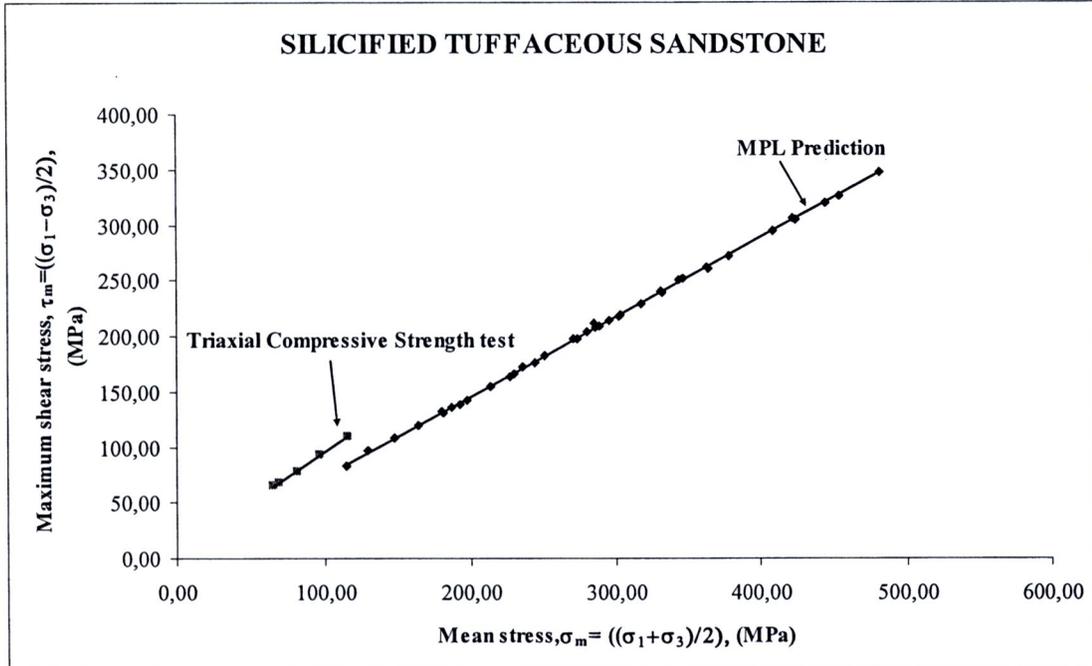
Rock Type	Uniaxial Compressive Strength (MPa)			Tensile Strength (MPa)	
	UCS Testing	CPL Prediction	MPL Prediction	Brazilian Testing	MPL Prediction
Andesite	115.0	194.4 ±1.2	100.5	17.0±1.6	13.9±4.3
Silicified Tuffaceous sandstone	111.4	244.8±2.0	130.8	13.1±3.3	12.1±7.3
Pebbly Tuffaceous sandstone	120.7	259.2±2.2	102.2	19.1±3.2	17.1±12.6

ตารางที่ 6.6 เปรียบเทียบระหว่างผลของค่ากำลังรับแรงกดในสามแกนตามมาตรฐาน และผลที่ได้จากการทดสอบจุดกดแบบปรับเปลี่ยนของหินทั้ง 3 ชนิด

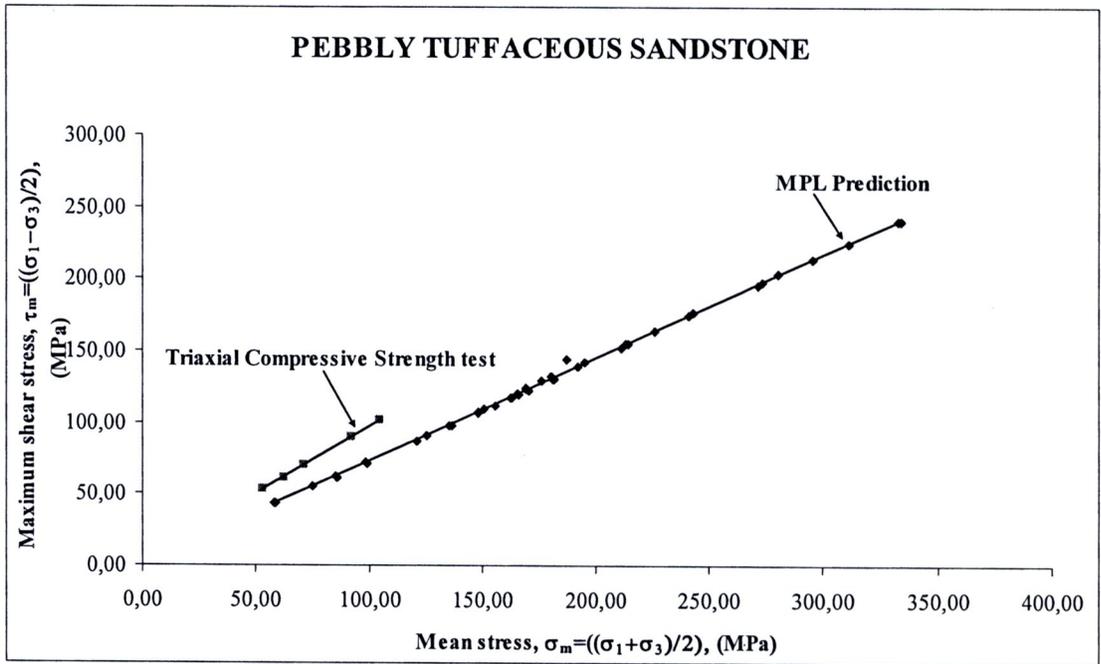
Rock Type	Triaxial Compressive Strength Test		MPL Predictions ( $\nu=0.25$ )			
	c (MPa)	$\phi_i$ (degree)	c (MPa)	S.D.	$\phi_i$ (degree)	S.D.
Andesite	12	69	4	66.6%	45	34.8%
Silicified Tuffaceous Sandstone	13	65	3	66.9%	46	29.2%
Pebbly Tuffaceous Sandstone	7	73	2	71.4%	46	40.0%



รูปที่ 6.1 แผนภูมิเปรียบเทียบระหว่างกฎเกณฑ์การแตกจากการทดสอบแรงกดในสามแกนและการทดสอบจุดกดแบบปรับเปลี่ยนสำหรับตัวอย่างหิน Andesite



รูปที่ 6.2 แผนภูมิเปรียบเทียบระหว่างกฎเกณฑ์การแตกจากการทดสอบแรงกดในสามแกนและการทดสอบจุดกดแบบปรับเปลี่ยนสำหรับตัวอย่างหิน Silicified Tuffaceous Sandstone



รูปที่ 6.3 แผนภูมิเปรียบเทียบระหว่างกฎเกณฑ์การแตกจากการทดสอบแรงกดในสามแกน และการทดสอบจุดกดแบบปรับเปลี่ยน สำหรับตัวอย่างหิน Pebbly Tuffaceous Sandstone